球墨铸铁表面激光熔覆 TiC/钴基合金组织和性能研究

童文辉 [1] 赵子龙 [1] 张新元 [1] 王 杰 [1] 国旭明 [1] 段新华 [2] 刘 豫 [2]

1 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院 沈阳 110136

2 沈阳大陆激光成套设备有限公司 沈阳 110136

摘 要 采用激光熔覆方法在球墨铸铁表面制备 30%TiC/Co 基合金熔覆层，通过 OM、SEM、EDS、XRD、TEM、MHV2000 数显显微硬度计，分析了熔覆层的显微组织、成分、物相、熔覆层的硬度变化规律。结果表明，球墨铸铁基体与熔覆层能形成良好的冶金结合，熔覆层由表层的树枝晶和内部的胞状晶组成，从熔体中原位析出初晶 TiC，且初晶 TiC 的量从熔覆层内部到表层逐渐增加，而未熔的 TiC 颗粒在晶间均匀分布，熔覆层主要由 γ-Co、TiC、CoC_x 和少量的 Cr_7C_3 相组成，熔覆层的最高硬度是 1278.8 HV，提高到球墨铸铁基体的 5 倍以上。

关键词 激光熔覆，钴基合金，TiC，微观组织，硬度

中图法分类号 TG456.7 **文章编号** 0412-1961(2016) 00−0000−00

Microstructure and Properties of TiC/Co-Based Alloy by Laser Cladding on the Surface of Nodular Graphite Cast Iron

TONG Wenhui [1], ZHAO Zilong [1], ZHANG Xinyuan [1], WANG Jie [1], GUO Xuming [1], DUAN Xinhua [2], LIU Yu [2]

1 School of materials science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

2 Shenyang Dalu Laser Complete Equipment Co. Ltd., Shenyang 110136, China

Correspondent: TONG Wenhui, associatec professor, Tel: (024)89728968, E-mail: tongwhcn@126.com

Manuscript received 2016-07-07，in revised form 2017-01-10

ABSTRACT Ductile cast iron, with excellent comprehensive mechanical properties, is widely used manufacturing traction wheel, crankshaft, cylinder liner, etc. However, in the harsh environment, it often leads to failure due to the serious surface wear. At present, the repair methods for the damaged parts are mainly thermal spraying, deposit welding and other methods, but the properties and application effect of the repaired parts need to be improved. In order to significantly improve the surface properties of ductile cast iron, the 30%TiC/Co-based alloy cladding layer prepared by laser cladding is put forward on the surface of ductile cast iron in this work. The microstructure, composition, phase, hardness of the laser cladding layer are investigated and analyzed by OM, SEM, EDS, XRD TEM and MHV2000 digital micro hardness tester. The results show that, the cladding layer can be integrated metallurgically with the nodular graphite cast iron matrix. The cladding layer consists of a surface layer of dendritic crystals and an internal cellular crystal. The primary phase of TiC from the melt is precipitated in situ during the solidification after laser heating. The amount of the primary TiC is gradually increased from the inner layer to the surface layer. Meanwhile, the undissolved TiC is dispersively distributed among the dendrites. The laser cladding layer is mainly composed of γ-Co, TiC, CoC_x and a small amount of Cr_7C_3. The hardness maximum of the cladding layer is 1278.8 HV, up to 5 times more than the hardness of the nodular graphite cast iron matrix.

KEY WORDS laser cladding, Co-based alloy, TiC, microstructure, hardness

收稿日期 2016-07-07 **定稿日期** 2017-01-10

作者简介 童文辉，男，满族，1971 年生，副教授，博士

通讯作者 童文辉，tongwhcn@126.com，主要从事凝固控制及其数值模拟，激光熔覆与高性能涂层制备，高性能镁合金及制备的研究

DOI 10.11900/0412.1961.2016.00288

球墨铸铁具有优良的综合机械性能，如较高的强度和韧性，且因其自身石墨球具有润滑作用，经常代替钢材应用于对使用性能要求较高的场合，但球墨铸铁在苛刻的使用环境中，经常因表面经受磨损而导致失效[1]，工业实际中目前主要采用热喷涂、堆焊等[2]方法进行修复，以延长其使用寿命。热喷涂层存在着气孔与显微裂纹，且与基材呈机械结合，使用过程中易剥落[3]；堆焊由于热输入量较大，导致涂层的稀释率过大以及基材易变形与开裂[4]。激光熔覆技术制备的涂层具有组织细小致密、与基材形成冶金结合强度高、基材热影响区与热变形小等优点[5]，在关键零部件的表面强化与修复领域具有广阔的应用前景。

国内已经有研究人员在球墨铸铁表面激光熔覆自熔性合金粉末制备高性能涂层，获得了很好的效果。张静等[6]在球墨铸铁表面激光熔覆 Fe-Cr-Si-B 涂层研究中得出，熔覆层的硬度较基体的提高 2.6 倍。李养良等[7]在球墨铸铁表面激光熔覆铁基合金的组织与性能研究中，熔覆层的硬度较基体的提高了 2.5 倍。孙志礼等[8]将镍基高温合金粉末激光熔覆于铸铁 CrMo 表面，形成了良好冶金结合的熔覆层，熔覆区的硬度在 1300~1500 HV，是基体的 1.5~2 倍，摩擦因数降低了 32%。杨胶溪等[9]在 QT600-3 基体上熔覆钴基合金，获得了最佳的熔覆工艺参数，分析了组织形貌及裂纹气孔等形成的原因。而陶瓷颗粒增强的复合材料激光熔覆涂层应用于提高球墨铸铁表面耐磨性能的研究尚鲜有报道。

钴基合金具有良好的耐高温、耐磨耐蚀性能，良好的热稳定性及熔化时较好的润湿性，适用于耐磨、耐蚀和抗热疲劳的零件[10,11]。TiC 具有高硬度、优异的耐磨损性能和综合力学性能，可以作为一种理想的第二相增强体[12]，在激光熔覆过程中，陶瓷颗粒 TiC 的加入使熔覆层中硬质相的数量增加，使熔覆层的硬度和耐磨性能显著提高[13]。TiC 作为第二相除了在钛合金表面激光熔覆中被研究[14,15]外，在工具钢表面也已经有研究人员尝试进行激光熔覆的研究[16,17]。为了显著提高球墨铸铁的激光熔覆层的性能，本工作将探索采用激光熔覆方法在球墨铸铁表面熔覆添加 TiC 的钴基合金粉末，以提高球墨铸铁表面性能，并分析熔覆层组织变化及对性能的影响。

1 实验方法

实验基体材料为球墨铸铁 QT600-3，试样尺寸为直径 140 mm、长 15 mm。激光熔覆材料为 TiC 颗粒和钴基合金粉末，其中钴基合金粉末成分(质量分数，%)为：C 0.2，Cr 21，Si 1.6，W 4.5，Fe 3，Mo 0.4，Ni 4，Mn 0.3，B 2.4，Co 余量，粒度为 45~90 μm，TiC 颗粒直径小于 10 μm，TiC 颗粒和钴基合金粉末按 3:7(体积分数)进行配比，然后用球磨机均匀混合。

激光熔覆实验采用 6kWCO_2激光器及其激光熔覆专用预置送粉系统，送粉方式为预置送粉。激光熔覆工艺参数：激光功率 P=3.5 kW、扫描速度 v=400 mm/min、光斑直径 2 mm、搭

接率 1.5，3 道次熔覆，熔覆层厚度为 3 mm。在熔覆过程中采用热量补偿方法对试样温度场进行调控。

对于激光熔覆试样，采用线切割机垂直于熔覆表面切割，获得金相试样，打磨抛光，采用 HF、HNO_3 和 H_2O 的混合试剂腐蚀，腐蚀时间为 35 s。采用 GX71 型 Olympus 金相显微镜(OM)观察熔覆层组织；使用 Zeiss-Sigma 型 SEM+EDS 观察熔覆层组织形貌并进行成分扫描；采用 X′Pert MPD Pro 型 X 射线衍射仪(XRD)进行激光熔覆层物相分析；采用 JEOL2100F 型透射电镜(TEM)分析涂层的成分；采用 MHV2000 型数显显微硬度计测试熔覆层硬度，施加载荷为 200 g，时间为 15 s。

2 实验结果及分析讨论

2.1 球墨铸铁表面激光熔覆的组织特征

图 1a 是球墨铸铁表面激光熔覆 30%TiC/Co 基合金熔覆层横截面形貌。由图 1a 可以看出熔覆层与基体整体结合紧密，形成良好的冶金结合，熔覆层在结构上分为熔化区(CZ)、结合区(BZ)和热影响区(HAZ)。由图 1a 和 b 可以看出，在熔覆层和基体结合的部位是一个呈波浪形、不规则、互相重叠的界面，激光熔覆能量高且集中，激光熔覆时瞬间接触基体材料使基体表面熔化，熔化了的基体材料通过熔池的对流传质作用[18]，扩散到熔覆层，造成熔覆层一定程度的稀释，导致熔合界面出现大幅度的波动，甚至会产生熔化区域沿受热方向的不连续性[19]，界面互相重叠和不连续可以增加熔覆层和基体之间的结合力，从而有效提高熔覆层在磨损时的抗剥落能力。

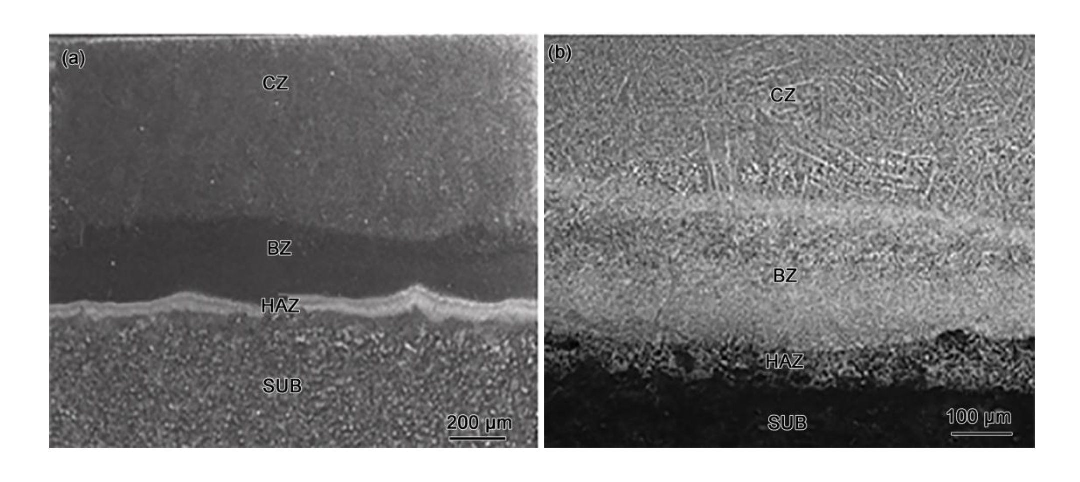


图 1 激光熔覆层横截面的宏观形貌和微观组织

Fig.1 Macroscopic morphology (a) and microstructure (b) of the cross section of laser cladding layer (CZ—cladding zone, BZ—bonded zone, HAZ—heat affected zone, SUB—substrate)

图 2a 为 30%TiC/Co 基合金熔覆层表层组织，主要为白色发达的γ-Co 树枝晶、灰色 TiC 树枝晶，共晶及分布于枝晶间的黑色 TiC 颗粒；图 2b 为熔覆层中间层组织，树枝晶消失，形成了胞状晶；图 2c 为熔覆层和基体的结合部位组织，形成了胞状晶、胞状枝晶和黑色颗粒状 TiC；图 2d 为熔覆层热影响区组织，形成了片状马氏体、少量残余奥氏体和石墨球；图 2a~c 共同特征是涂层中都含有 TiC，其中，除未熔的黑色 TiC 颗粒外，还有溶解的 TiC 在凝固过程中原位析出的细小 TiC 初晶颗粒。

在激光辐照时，TiC 粉末对激光能量的吸收率比钴基合金高很多[20,21]，同等条件下，TiC 吸收的能量更多，不仅小颗粒 TiC 或较高温度的涂层表面处 TiC 颗粒将全部被溶解，而且大颗粒 TiC 的边缘或凸起部位也部分溶解[22]。随着激光束的移动，熔池温度迅速下降，合金熔体中溶解的 Ti 和 C 又从熔体中重新析出 TiC。

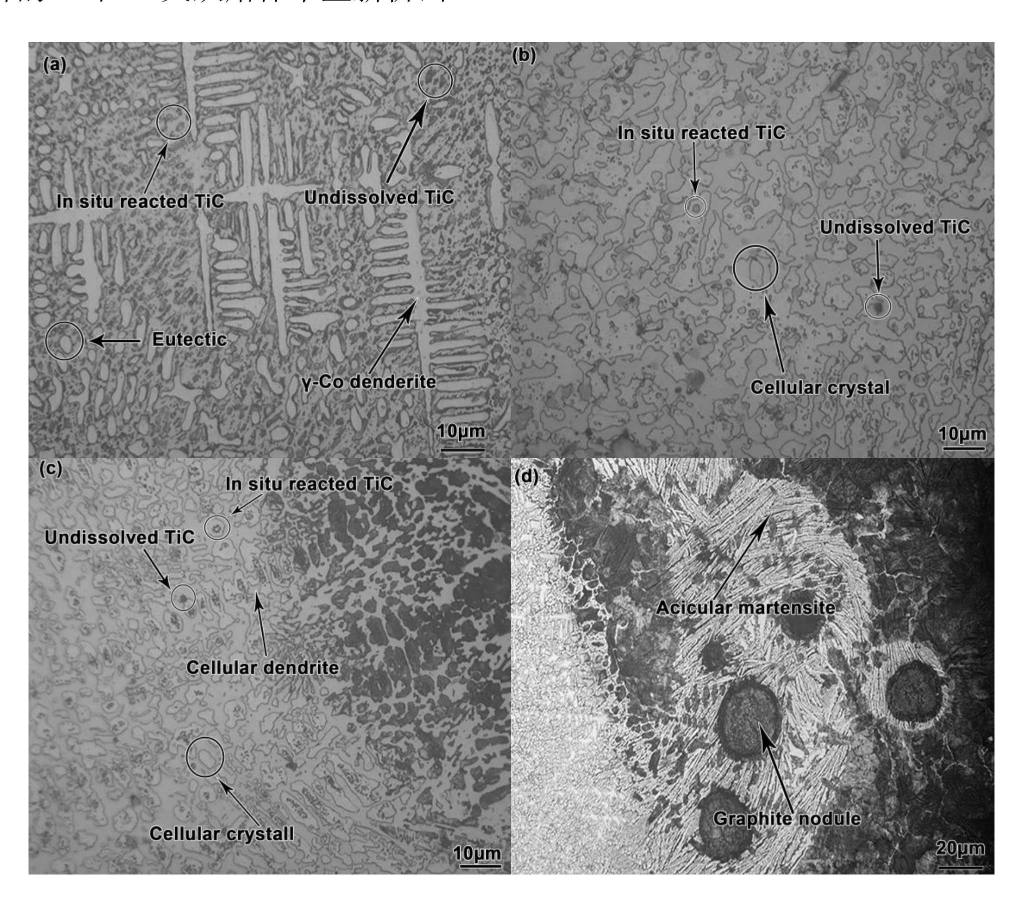


图 2 球墨铸铁表面 30%TiC/Co 基合金激光熔覆层横截面组织形貌

Fig.2 Microstructures of the 30%TiC/Co-based alloy laser cladding layer on the surface of ductile cast iron

(a) near surface (b) middle zone of layer (c) combining zone (d) heat affected zone

由图 2 可看到，球墨铸铁基体表面(图 2d)到熔覆层表层(图 2a)不同部位组织存在显著差异。激光熔覆时，激光辐照使合金粉末和部分基体快速熔化形成熔池，当激光束向前移开熔池后，熔池内的熔体将从基体表面开始自下而上快速凝固，首先，熔化了的基体表层快速凝

固形成了片层状的马氏体包裹着球状石墨，如图 2d 所示。在基体表层和熔覆层结合处，由于存在着稀释作用，在凝固时，两者凝固组织融合生长，实现了基体与熔覆层的良好冶金结合。在冶金结合层以上，熔覆层熔体由于快速凝固的溶质捕获效应，使得凝固界面前沿的成分过冷较小，从而形成胞状晶或者胞状树枝晶；而随着凝固的进行，结晶潜热不断放出，使得熔体的冷却速率下降，溶质捕获效应减弱，成分过冷增大，从而凝固组织从胞晶转变为发达的树枝晶。

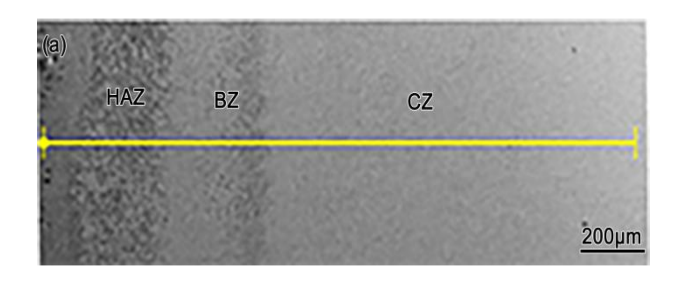
熔覆层熔体凝固开始时，由于快速凝固的溶质捕获效应[23]，使 TiC 的析出较少，随着凝固的进行，结晶潜热的释放使凝固速度减小，溶质捕获效应减弱，在凝固后期，即熔覆层的表层凝固时，TiC 初生相大量析出，从而使熔覆层中析出的 TiC 在表层分布较多，而在熔覆层的下层和中间层分布较少，而未熔化的 TiC 颗粒则在整个凝固过程中呈现出不均匀分布状态。

2. 2 30%TiC/Co 基合金激光熔覆层成分和物相组成分析

为了探明熔覆层中各元素的分布情况，利用 EPMA 对熔覆层横截面进行了线扫描，如图 3 所示。结果表明：Ti 在熔覆层表层含量较多，在远离熔覆层表层含量相对较少(图 3b)；除了基体中 C 元素的扩散而导致的 C 元素在结合区和热影响区含量较高外，C 元素分布和 Ti 一致(图 3c)，由此可推断熔覆层表层 TiC 颗粒含量相对较多。

图 4 是激光熔覆层(CZ)共晶组织的 SEM 像和 EDS 分析结果。由图可见，在共晶组织中弥散分布着很多暗黑色相，由 EDS 结果可推断暗黑色相为 TiC 颗粒和溶解 TiC 又析出形成的枝晶，这也证实了图 2 中树枝晶间均匀分布的黑色相为 TiC 颗粒和溶解 TiC 形成的枝晶。

为确定熔覆层中物相，对熔覆层进行 XRD 分析，结果如图 5 所示，表明熔覆层主要由γ-Co、TiC、CoC_x 和少量的 Cr_7C_3 组成。Co 在高温下(大于 417 ℃)以 fcc 结构的 γ-Co 形式存在，而在室温下则以 hcp 结构的 ε-Co 形式存在，但由于激光熔覆的冷却速率极快，使凝固结晶的 γ-Co 来不及发生相变而得以保留到室温[24]；激光熔覆时，由于 TiC 颗粒发生部分溶解，分解为 Ti 和 C 元素溶解于合金熔体中，除了凝固时重新析出 TiC 以外，C 与钴基合金中的 Co、Cr 等元素还形成 CoC_x、Cr_7C_3 碳化物。



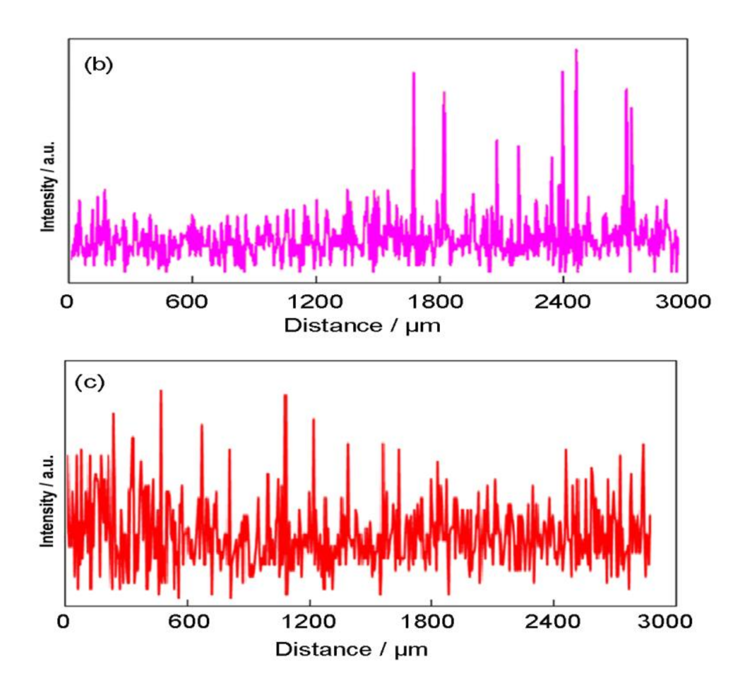
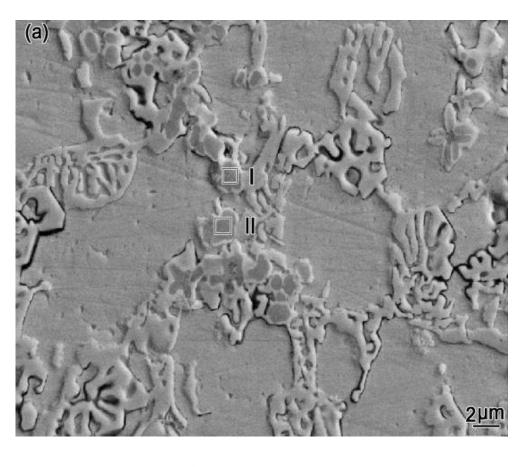
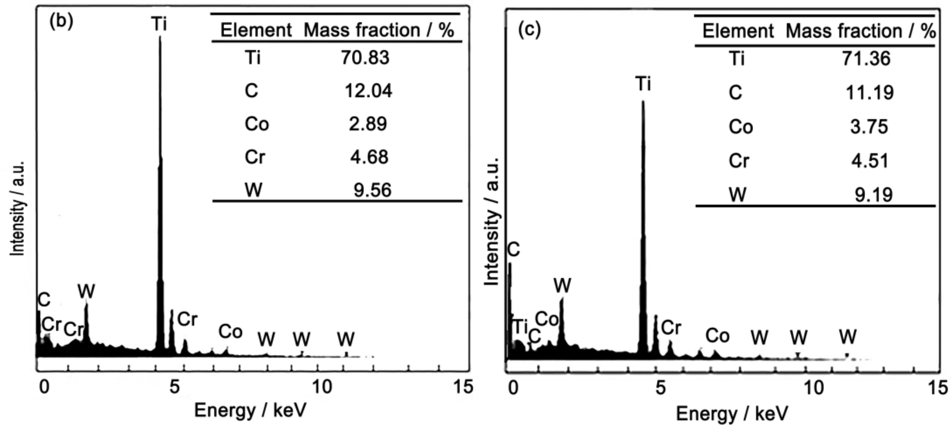


图 3 熔覆层横截面线扫描方向和元素分布

Fig.3 Scanning direction (a) and element distribution of Ti (b) and C (c) of cross section of cladding layer





Element	Mass fraction / %
Ti	70.83
C	12.04
Co	2.89
Cr	4.68
W	9.56

Element	Mass fraction / %
Ti	71.36
C	11.19
Co	3.75
Cr	4.51
W	9.19

图 4 激光熔覆层横截面 SEM 像和 EDS 结果

Fig.4 Cross sectional SEM image of cladding layer (a) and EDS analyses of points I(b) and II (c)

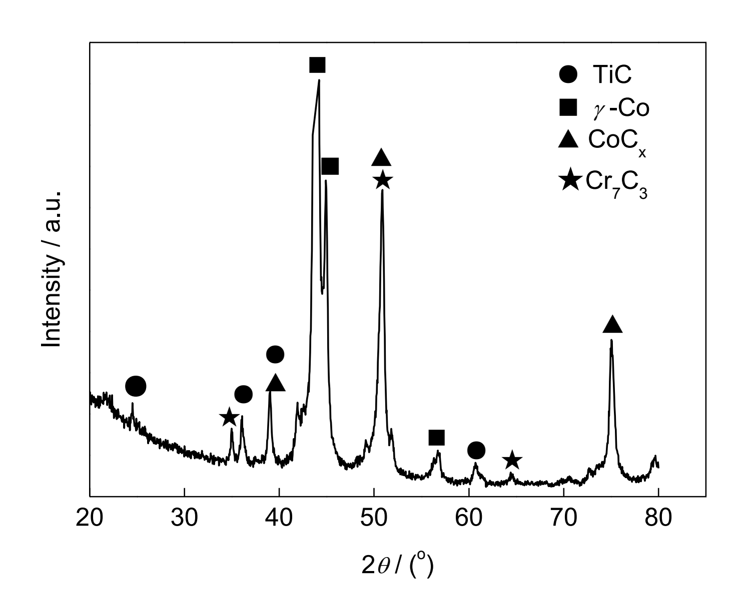


图 5 30%TiC/Co 基合金熔覆层的 XRD 谱

Fig.5 XRD spectrum of the laser cladding layer of 30%TiC/Co-based alloy

2. 3 30%TiC/Co 基合金激光熔覆层的 TEM 观察与分析

对 30%TiC/Co 基合金熔覆层进行 TEM 观察与分析，结果如图 6 所示。在图 6a 中，可看到呈不规则六方形的相分布在熔覆层中，其衍射花样符合 fcc 结构，经计算该颗粒相的晶格常数 a=0.4337 nm，稍高于具有 fcc 结构的 TiC 的晶格常数 0.43274 nm，这种晶格常数的差异可能是由于激光的急热急冷作用下 TiC 晶粒发生晶格畸变造成的[25]，由此认为该相为 TiC 相。

对熔覆层的枝晶进行选区电子衍射(SAED)谱如图 6b 所示。分析发现，熔覆层中初生的枝晶主要为 fcc 结构的 γ-Co 固溶体，树枝晶的生长除受热流控制外，还有晶体生长的择优取向，对于 TiC/Co 基合金，其树枝晶的择优取向为〈100〉方向，别的取向生长则受到限制。

激光熔覆时，合金熔体中的 C 与基体 Co 在凝固时形成的 CoC_x 碳化物存在于树枝晶间，如图 6c 所示。这种硬质相 CoC_x 具有 fcc 结构，分析其衍射花样，并计算得到该碳化物硬质相的晶格常数 a=0.3697 nm，接近于 CoC_x 理论晶格常数 0.36061 nm，晶格常数的差异是由于 TiC/Co 基合金中部分合金元素的溶解造成 CoC_x 硬质相晶格常数的变化。

钴基合金粉末中 Cr 元素含量较高，在熔覆层凝固过程中，先析出固溶合金元素的初生 γ-Co 固溶体，然后在初生固溶体间形成共晶组织(γ-Co+Cr_7C_3)[26]，在 XRD 分析中可分辨出 Cr_7C_3，但在 TEM 分析时，由于 Cr_7C_3 晶格结构复杂，而且共晶组织薄而细小，导致 TEM 分析结果受到干扰，未能确认 Cr_7C_3。

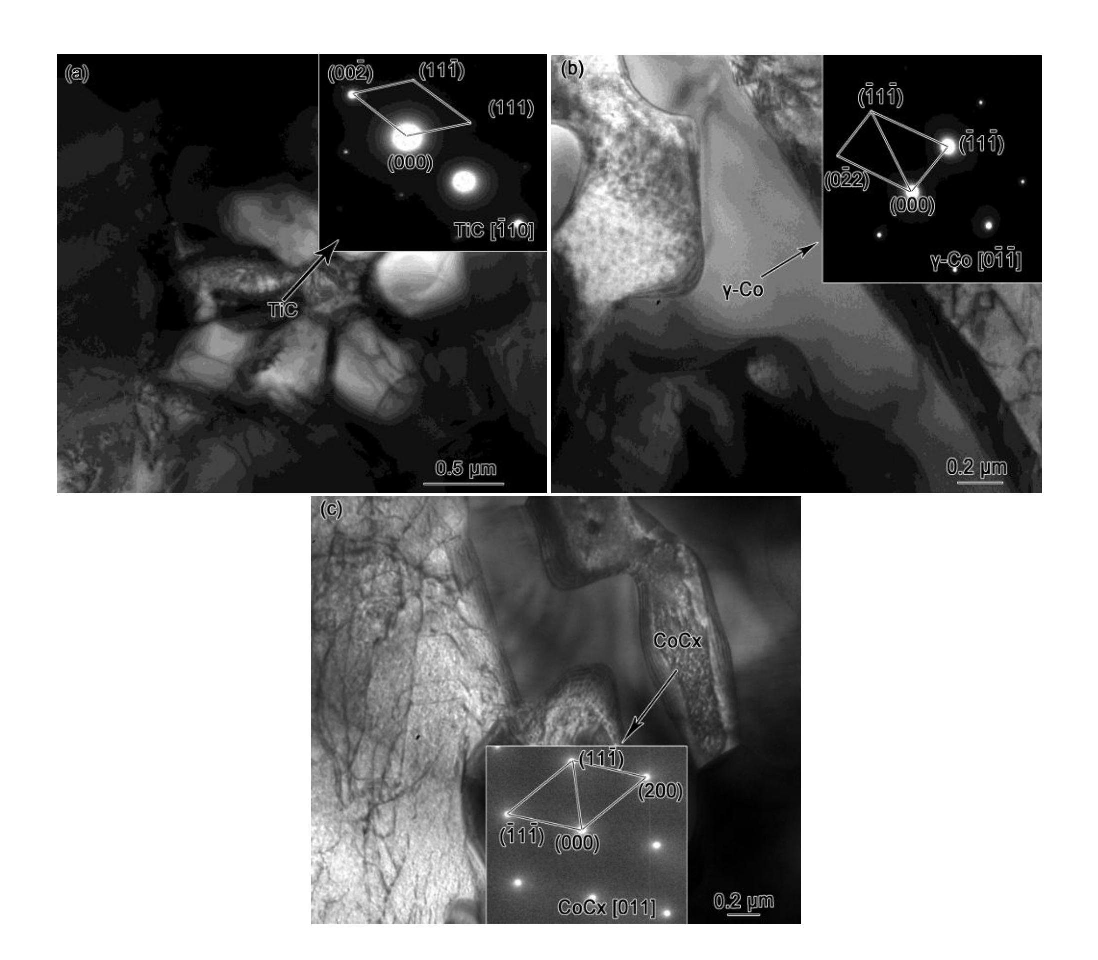


图 6 30%TiC/Co 基合金熔覆层中增强相的 TEM 像及 SAED 谱

Fig.6 TEM images and SAED patterns (insets) of the enhanced phase in the laser cladding layer of 30%TiC/Co-based alloy

(a) TiC (b) γ-Co (c) CoC_x

2. 4 30%TiC/Co 基合金激光熔覆层的硬度

30%TiC/Co 基合金熔覆层横截面不同部位的硬度如图 7 所示(熔覆层自由表面取为坐标原点)。可见，随着与球墨铸铁基体表面距离增加，在热影响区和结合区硬度快速提高，而在熔化区硬度增加缓慢，直到熔覆层表层硬度又有快速提高，熔覆层最高硬度为 1278.8 $HV_{0.2}$，提高到球墨铸铁基体硬度(200~240 $HV_{0.2}$)的 5 倍以上，对比球墨铸铁表面激光熔覆钴基合金熔覆层的硬度[27]可知，30%TiC/Co 基合金熔覆层硬度显著提高，这主要是由于 TiC 颗粒增强所引起的。

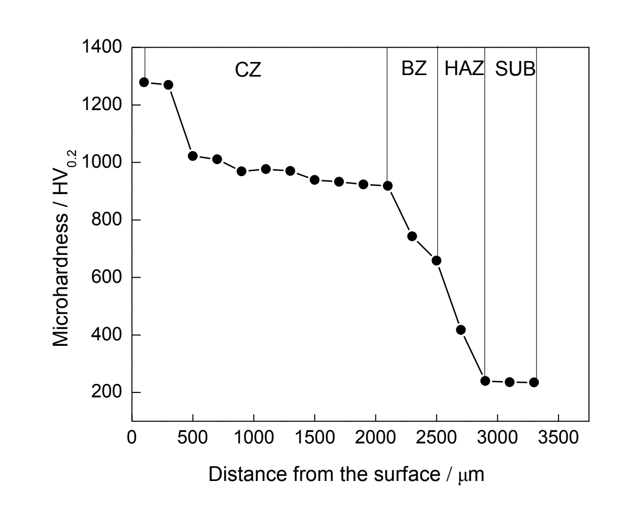


图 7 熔覆层横截面显微硬度分布

Fig.7 Microhardness distribution of the cross section of the cladding layer (CZ—cladding zone, BZ—bonded zone, HAZ—heat affected zone, SUB—substrate)

球墨铸铁基体经过激光熔覆后，在热影响区发生了组织转变，形成了马氏体，并且球状石墨部分溶解球径变小[28]，硬度略有增加；在熔覆层及基体的结合部位，由于快速熔化和凝固过程中基体和熔覆层发生了稀释，硬度快速提高；随着熔池自下而上凝固的进行，熔覆层稳定地呈胞状生长，溶解的 TiC 少量析出，未溶解的 TiC 被凝固界面部分捕获而存在于晶间，因此，硬度缓慢地增加；当熔池中的熔体凝固到后期，即在 TiC/Co 基合金熔覆层表层，组织紧密且均匀，由于凝固溶质分配而富集到熔覆层表层的溶解 TiC 重新析出大量树枝晶及其它合金元素碳化物等硬质相，硬度因此再次快速增大。

3 结论

（1） 球墨铸铁表面激光熔覆 TiC/Co 基合金熔覆层分为熔化区、结合区和热影响区，基体和熔覆层呈冶金结合，表面成形良好，无裂纹、气孔等缺陷。

（2） 熔覆层由表层的树枝晶和内部的胞状晶组成，从熔体中原位析出初晶 TiC，且初晶 TiC 的量从熔覆层内部到表层逐渐增加均匀地分布在熔覆层中；熔覆层主要由 γ-Co、TiC、CoC_x 和少量的 Cr_7C_3 相组成。

（3） 熔覆层硬度随着与球墨铸铁基体熔覆表面的距离增加，先快速增大，后平缓增加，最后在表层区域又快速增大，熔覆层硬度在 900 $HV_{0.2}$ 以上，最高硬度为 1278.8 $HV_{0.2}$，激光熔覆 TiC/Co 基合金涂层的硬度提高到基体的 5 倍以上。

参考文献

[1] Fang G R, Wang Y Z. The birth, application, tendency of technology development——The one of the most

important technology progresses of the material science of the 20-th century [J]. Mod. Cast Iron, 2000, (1): 3
(房贵如, 王云昭. 现代球墨铸铁的诞生、应用及技术发展趋势——20 世纪材料科学最重大的技术进展之一 [J]. 现代铸铁, 2000, (1): 3)

[2] Gao B. Experiment research on laser cladding repairing technology based on multiple-cladding [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010
(高 宾. 基于复合堆焊的激光熔覆修复技术的实验研究 [D]. 上海交通大学, 2010)

[3] Xie Y T, Wu G H, Wang C X, et al. Study on alloy ductile iron air-cooled roller repaired by laser cladding [J]. Mater. Heat Treatment Technol., 2012, 41(24): 168
(谢雨田, 吴光辉, 王春霞等. 激光熔覆修复合金球墨铸铁风冷辊的研究 [J]. 热加工工艺, 2012, 41(24): 168)

[4] Shan J G, Zhang D, Ren J L. Study on the quality of high power density focused light beam powder surfacing [J]. Chin. J. Mechanical Eng., 2001, 37(10): 47
(单际国, 张 迪, 任家烈. 高能密度聚焦光束粉末堆焊质量的研究 [J]. 机械工程学报, 2001, 37(10): 47)

[5] Pei Y T. In-situ gradient coating of TiC_p/Ni alloy by laser cladding and its mechanism [J]. Acta Metall. Sin., 1998, 34: 987
(裴宇韬. 激光熔覆 TiC_p/Ni 合金自生梯度涂层及其自生机制 [J]. 金属学报, 1998, 34: 987)

[6] Zhang J, Liu J C, Zhang F Q, et al. Fe-Cr-Si-B coating by laser cladding on nodular cast iron [J]. Trans. Mater. Heat Treatment, 2010, 31(5): 133
(张 静, 刘继常, 张福全等. 球墨铸铁表面激光熔覆 Fe-Cr-Si-B 涂层 [J]. 材料热处理学报, 2010; 31(5): 133)

[7] Li Y L, Du D M, Wang L. Microstructure and properties of surface laser cladding Fe-base alloy layer on ductile cast iron [J]. Mater. Mech. Eng., 2011, 35(10): 16
(李养良, 杜大明, 王 利. 球墨铸铁表面激光熔覆铁基合金层的组织与性能 [J]. 机械工程材料, 2011, 35(10): 16)

[8] Zhang Y F, Yan Y T, Sun Z L. Wear characteristics of Ni-based super-alloy onto CrMo cast iron by laser cladding [J]. Lubric. Eng., 2007, 32(7): 108
(张云凤, 闫玉涛, 孙志礼. 铸铁 CrMo 表面激光熔覆 Ni 基高温合金粉末的磨损特性 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(7): 108)

[9] Yang J X, Zuo T C, Xu W Q, et al. The research of laser cladding Co-base alloy coating on ductile cast iron [J]. Laser Technol., 2006, 30: 517
(杨胶溪, 左铁钏, 徐文清等. 球墨铸铁表面激光熔覆钴基合金涂层的研究 [J]. 激光技术, 2006, 30: 517)

[10] Xu W X, Zhang Q L, Yao J H. Research on high-temperature wear resistance of laser cladding Co-based WC composite coating on hot-forging die [J]. Appl. Laser, 2013, 33: 370
(徐卫仙, 张群莉, 姚建华. 热锻模激光熔覆 Co 基 WC 涂层的高温磨损性能研究 [J]. 应用激光, 2013, 33: 370)

[11] Li M X, He Y Z, Sun G X. Microstructure and wear resistance of laser clad cobalt-based alloy multi-layer coatings [J]. Appl. Surf. Sci., 2004, 230: 201

[12] Emamian A, Corbin S F, Khajepour A. Tribology characteristics of in-situ laser deposition of Fe-TiC [J]. Surf Coat Technol., 2012, 206: 4495

[13] Abboud J H, West D R F. *In situ* production of Ti-TiC composites by laser melting [J]. J. Mater. Sci. Lett., 1992, 11: 1675

[14] Zhang S, Wu W T, Wang M C, et al. In-situ synthesis and wear performance of TiC particle reinforced composite coating on alloy Ti6Al4V [J]. Surf. Coat Technol., 2001, 138: 95

[15] Man H C, Zhang S, Cheng F T, et al Microstructure and formation mechanism of in situ synthesized TiC/Ti surface MMC on Ti-6Al-4V by laser cladding [J]. Scr. Mater., 2001, 44: 2801

[16] Nga P T H. Laser cladding TiC particles reinforced Co-based alloy coating on H13 steel surface and its high-temperature wear property [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013

(范氏红娥. H13 钢表面激光熔覆 TiC/Co 基涂层及其高温磨损性能研究 [D]. 昆明：昆明理工大学, 2013)

[17] Zhao W Y. Research on microstructure and properties of Stellite 6 coatings by laser cladding on 2Cr12MoV [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015

(赵文雨. 2Cr12MoV 表面激光熔覆 Stellite6 涂层的组织及性能研究 [D]. 上海：上海交通大学, 2015)

[18] Tu Y, Zhang Y Z, Xi M Z. Investigation of nickel-based alloy coating on stainless steel by laser cladding [J]. Chin. J. Rare Met., 2008, 32: 598

(涂 义，张永忠，席明哲. 不锈钢表面激光熔覆镍基合金层研究 [J]. 稀有金属, 2008, 32: 598)

[19] Wang C Q, Liu H X, Zhou R. Characteristic behaviors of particle phases in NiCrBSi-TiC composite coating by laser cladding assisted by mechanical vibration [J]. Acta Metall. Sin., 2013, 49: 221

(王传琦，刘洪喜，周 荣. 机械振动辅助激光熔覆 NiCrBSi-TiC 复合涂层中颗粒相行为特征 [J]. 金属学报, 2013, 49: 221)

[20] He L H, Zhou F, Yang H Y. Research of in situ synthesis of TiC-TiB_2 reinforced Co-based composite coating by laser cladding [J]. Laser Technol., 2013, 37: 306

(何良华，周 芳，杨蕙瑶. 激光熔覆原位合成 TiC-TiB_2 增强钴基复合涂层的研究 [J]. 激光技术，2013，37: 306)

[21] Qiu X L. TiC based cermet coating produced by powder feeding laser cladding [J]. Heat Treatment, 2006, 35(5): 19

(邱小林. 激光熔覆 TiC 金属基陶瓷涂层的研究 [J]. 热加工工艺, 2006, 35(5): 19)

[22] Zhang S, Zhang C H, Wu W, Wang, et al. An *in situ* formed TiC particle reinforcement composite coating induced by laser melting on surface of alloy Ti6Al4V and its wearing performance [J]. Acta Metall. Sin., 2001, 37: 315

(张 松，张春华，吴 维等. Ti6Al4V 表面激光熔覆原位自生 TiC 颗粒增强钛基复合材料及摩擦磨损性能 [J]. 金属学报, 2001, 37: 315)

[23] Li Q, Li D Z, Qian B N. Progress of dendritic morphology evolution during solidification process [J]. Mater. Rev., 2004, 18(4): 5

(李 强，李殿中，钱百年. 凝固过程中枝晶组织形貌演变模拟进展 [J]. 材料导报, 2004, 18(4): 5)

[24] Li M X, He Y Z, Sun G X. Microstructure of laser cladding Co-based alloy on Ni-based super alloy [J]. Trans. China Welding Inst., 2002, 23(6): 17

(李明喜，何宜柱，孙国雄. Ni 基高温合金表面激光熔覆 Co 基合金的组织 [J]. 焊接学报, 2002, 23(6): 17)

[25] Wang X H, Zhang M, Zou Z D, et al. Microstructure and properties of laser cladding TiCp/Ni-based alloys composite coating [J]. Chin. J. Mechanical Eng., 2003, 39(2): 37

(王新洪，张 敏，邹增大等. 激光熔覆 TiCp/Ni 基合金复合涂层的显微组织与性能 [J]. 机械工程学报, 2003, 39(2): 37)

[26] He Y Z, Si S H. Xu K, et al. Effect of Cr_3C_2 particles on microstructure and corrosion-wear resistance of laser cladding Co-based alloy coating [J]. China J. Lasers, 2004, 31: 1143

(何宜柱，斯松华，徐 琨等. Cr_3C_2 对激光熔覆钴基合金涂层组织与性能的影响 [J]. 中国激光，2004，31: 1143)

[27] Tong W H, Zhao Z L, Wang J, et al. Microstructure and property of laser cladding cobalt based alloy coating on ductile cast iron [J]. Chin. J. Rare Met., 2016, 9: 22

(童文辉，赵子龙，王 杰等. 球墨铸铁表面激光熔覆钴基合金涂层的组织与性能 [J]. 稀有金属,2016, 9: 22)

[28] Li J, Zhong M L, Liu W J. Microstructures and properties of laser-clad in situ particle reinforced Ni-base composite coating on 55Mn steel [J]. Heat Treat Met., 2006, 31(11): 8

(李 晶，钟敏霖，刘文今. 55Mn 钢表面激光熔覆原位析出颗粒增强 Ni 基复合涂层的组织与性能 [J]. 金属热处理, 2006, 31(11): 8)